

"天宫一号"空间站概念图

中国航天技术的突破性发展

李成智
北京航空航天大学 人文社会科学高等研究院 北京 100191

摘要 文章回顾了中国航天技术20世纪70年代至今的发展概况，包括运载火箭的系列发展、科学卫星的研制与运行、返回式卫星的研制发射、通信卫星系列化发展、气象卫星系列化发展、遥感与资源卫星的发展、"北斗"卫星导航系统建设进展、"嫦娥工程"进展，以及载人航天工程进展。简要总结了中国航天技术发展的历史经验。

关键词 航天技术，技术发展，经验，中国

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.09.006

自 1956 年 10 月中国组建导弹研究机构——国防部第五研究院（以下简称"国防部五院"）起，中国航天事业从无到有，从弱到强，中国逐步跻身世界航天大国行列。中国航天事业发展从导弹开始起步，导弹研究经历了从近程到中程、从远程到洲际、从液体到固体、从固体到机动、从陆基到潜射、从第一代到第二代的发展道路，形成了综合性的战略核打击能力[1]。在"两弹一星"基础上，中国进一步完善并发展出系列运载火箭，开始了科学卫星、应用卫星的系列化发展，产生了强大的社会和经济效益[2]。20 世

资助项目：国家社会科学基金（19BDJ0642）
修改稿收到日期：2019年8月23日

纪 80 年代以后，中国启动并实施了多项重大航天工程，包括载人航天工程、“北斗”卫星导航系统、“高分专项工程”和“嫦娥工程”，都取得了重大突破。

1 运载火箭的系列发展

自 20 世纪 70 年代，中国先后研制成功“长征一号”“长征二号”“长征三号”和“长征四号”系列运载火箭。20 世纪 80 年代后期，在上述型号基础上又陆续研制了“长征二号E”“长征二号F”“长征三号甲”“长征三号乙”“长征四号甲”和“长征四号乙”等型号的运载火箭，满足了大容量应用卫星和载人飞船、空间实验室发射的需要。进入21世纪，新一代“长征”系列火箭研制成功，运载能力大为提高，可满足发射大型载荷和空间站舱段的需要。

1.1 “长征”系列火箭的奠基

“长征一号”运载火箭是在“东风四号”导弹基础上研制的，运载能力低，只发射过两颗卫星。1965 年 8 月中央专委第十三次会议批准中国科学院《关于发展我国人造卫星工作规划方案建议》，确定发展应用卫星为主的方针，其中遥感卫星是重点[3]。1967 年 9 月，第七机械工业部（以下简称“七机部”）召开返回式卫星方案论证会，确定运载火箭以“东风五号”洲际导弹为基础进行改制，用于发射返回式卫星。1970 年 6 月 5 日，周恩来主持召开中央专委会议，将火箭和返回式卫星列为国家重点建设项目。1973 年 11 月，七机部第一研究院（以下简称“七机部一院”）将这种火箭命名为“长征二号”，其近地轨道运载能力 1 800 千克。1974 年 11 月 5 日和 1975 年 11 月26 日，“长征二号”先后两次发射返回式卫星。1980 年，确定了“长征二号”改进型“长征二号丙”的技术状态，运载能力提高到2 500 千克。

1970 年 6 月，七机部一院和中国空间技术研究院（五院）分别组织队伍，开展运载火箭和通信卫星新技术的研究。1970 年 11 月 9 日，国防科委委托七机部召开“东方红二号”通信卫星方案讨论会，研究了卫星的总体方案设想。1974 年 5 月 19 日，周恩来对通信卫星研制工作做了批示：“先将通信卫星的制造协作和使用方针定下来，然后按计划分工，做出规划，督促进行。”[4]经过多年研究和论证，1977 年 12 月形成了发射通信卫星的两种火箭方案：一种是加装液氢液氧第三级组成的“长征三号”；另一种是加装常规第三级组成的“长征四号”。

“长征三号”可将 1 430 千克的卫星送入同步转移轨道，使用了低温液氢液氧发动机，突破了氢氧发动机失重条件下二次点火技术。1984 年 4 月 8 日，“长征三号”火箭将中国首颗试验通信卫星——“东方红二号”送入同步转移轨道。4 月 16 日，卫星定点成功。发射静止卫星是中国航天事业的一个重要里程碑。“长征四号”由上海航天技术研究院负责，其太阳同步转移轨道运载能力为 1 500—2 100千克[5]。1988 年 9 月 7 日和 1990 年 9 月 3 日，“长征四号甲”火箭发射成功两颗“风云一号”卫星。“长征四号乙”太阳同步轨道运载能力达2 200 千克，可用于发射地球资源卫星，1999 年和 2000 年 2 次成功发射地球资源卫星[6]。

1.2 “长征”系列火箭的成熟

利用“东风五号”导弹为基础研制的长征火箭还包括“长征二号 E”“长征三号甲”系列火箭。研制目的是提高运载能力并打入国际航天发射市场[7]。“长征二号 E”火箭以“长征二号丙”为芯级，在一级箭体上并联 4 个液体助推火箭，低轨道运载能力由 2.5 吨提高到 9.2 吨，配以不同上面级同步转移轨道运载能力可达 3.0—4.8 吨[8]。1990 年 7 月 16 日第一枚“长征二号 E”火箭发射成功。截至 2002 年底，“长征二号 E”共计发射了 8 次。

“长征三号甲”在“长征三号”基础上，重点对第三级发动机进行改进。1994 年 2 月 8 日，“长征三号甲”首次飞行试验获得成功。1994 年 11 月

和1997年5月又成功进行了2次发射。以“长征三号甲”为基础，分别捆绑4个和2个助推器组成“长征三号乙”和“长征三号丙”火箭，同步转移轨道运载能力分别为5.0吨和3.7吨[9]。1996年2月15日“长征三号乙”首次发射。“长征三号”甲、乙、丙这3个型号除用于通信卫星发射外，还用于气象卫星、导航卫星、“嫦娥”系列月球探测器的发射。

1.3 新一代“长征”系列火箭

20世纪90年代，随着“长征三号甲”系列火箭的研制成功以及载人航天计划的实施，新一代火箭的规划工作开始。2001年，中国运载火箭技术研究院提出新一代火箭的运载能力、推进剂种类、级数以及设计原则（即高可靠、低成本、低污染、模块化、通用化）。2002年，该院确定“一个系列、两种发动机、三个模块”的总体发展思路，以及“通用化、系列化、组合化”的设计思想。2005年，“长征五号”（代号：CZ-5）运载火箭正式立项。

“长征五号”火箭设计方案的“三个模块”是使用液氧/液氢发动机的5米直径模块、使用液氧/煤油发动机的3.35米直径模块和2.25米直径模块；“两种发动机”是地面推力50吨的YF-77氢氧发动机、地面推力120吨的YF-100液氧/煤油发动机。利用“三个模块”组合，可形成“长征五号”大型运载火箭、“长征七号”中型火箭和“长征六号”小型火箭，形成近地轨道运载能力1.5—25.0吨，地球同步转移轨道运载能力1.5—14.0吨的完整火箭系列[10]。2015年9月20日，“长征六号”火箭发射取得成功，创造了我国“一箭20星”发射新纪录[11]。“长征七号”低轨道运载能力13.5吨，达到国外同类火箭的先进水平[12]。2016年6月25日和2017年4月20日，“长征七号”两次发射成功。“长征五号”分别于2016年11月3日和2017年7月2日进行了2次发射。

为适应快速发射小卫星的需要，中国运载火箭技术研究院研制了中国第一枚全固体运载火箭“长征十一号”。该火箭为四级结构，700公里太阳同步轨道运载能力350千克，低地球轨道运载能力700千克。“长征十一号”火箭具有可整体贮存、操作简单、发射成本低、发射周期短的特性，其最大的优势是“快速、便捷、灵活”[13]。2015年9月25日，“长征十一号”首次发射，成功将4颗微小卫星送入太空。截至2018年，“长征十一号”共进行了6次成功发射。

“长征五号”“长征六号”“长征七号”和“长征十一号”火箭使中国运载火箭技术得到显著提升，完善了火箭谱系，大幅提高了运载能力和国际竞争力。

2 科学和应用卫星研制

中国自1970年发射成功第一颗人造卫星后，科学卫星与应用卫星研制随即开始。此后，中国在遥感卫星、通信卫星、气象卫星、资源卫星、导航卫星等领域都取得了很大进展，为国民经济和国防建设作出了重大贡献。中国还研制了通用卫星平台并实现整星出口，缩短了研制周期、节约了研制经费，提高并获得了良好的国际声誉。

2.1 科学探测卫星

2.1.1 “实践”系列卫星

科学探测卫星以“实践”系列为主。“实践一号”卫星是专用科学探测卫星。1971年3月3日，“实践一号”卫星发射成功，卫星设计寿命为1年，实际运行时间长达8年。“实践二号”卫星是第一颗专门用于空间物理探测的科学卫星。1981年9月20日，“风暴一号”火箭发射成功，并将3颗“实践二号”卫星发射入轨。“一箭三星”发射成功，使中国成为世界上第四个具备一箭多星发射能力的国家。“实践四号”卫星是一颗空间环境探测卫星，1994年2月8日发射成功，该卫星是小卫星研制的一次尝试[14]。“实践五号”是中国第一颗现代小卫星，

1999年5月10日发射成功，完成了多项技术试验与科学探测任务，卫星技术达到当时的国际先进水平[15]。

2004年9月9日，“实践六号”A、B两颗卫星发射入轨，主要用于空间环境探测，空间辐射环境及其效应探测。2006年10月24日和2008年10月25日，“实践六号”02组、03组卫星发射升空。上海航天技术研究院研制的“实践七号”卫星于2005年7月6日发射，主要用于空间环境探测。2012年以后，中国还陆续发射了“实践九号”“实践十号”“实践十一号”直到“实践十八号”卫星，分别应用于科学研究、微重力实验、卫星平台开发、新型发动机研制等领域。

2.1.2 地球空间双星探测计划

21世纪初，中国科学院、中国航天科技集团公司和欧洲空间局联合实施了“地球空间双星探测计划”（以下简称“双星计划”），探测近地空间地球磁场及其粒子运动变化规律。“双星计划”由两颗卫星组成，分别为“探测一号”和“探测二号”。“探测一号”于2003年12月30日发射，设计寿命18个月。“探测二号”于2004年7月25日发射，设计寿命1年。“探测一号”在轨正常工作45个月，延寿运行27个月。“探测二号”工作时间也远远超过设计寿命。“双星计划”取得了许多原创性的科学发现，受到国内外科学界的好评[16]。

2.1.3 “墨子号”量子科学实验卫星

在科学实验卫星领域，由中国科学技术大学潘建伟团队和中国科学院微小卫星创新研究院联合研制，于2016年8月16日发射的“墨子号”量子科学实验卫星相当引人注目。该卫星主要用于开展卫星与地面站建立高精度光链路、量子通信实验。该卫星完成了三大科学任务——量子纠缠分发、星地量子密钥分发和地星量子隐形传态，得到国际科学界的高度评价[17,18]。

2.2 返回式卫星

返回式卫星是中国应用卫星中最早发展、率先进入实用阶段和达到世界先进水平的一类卫星，不但在遥感应用上取得了突出成绩，在航天器技术上也获得了许多成果，为中国的载人航天事业打下了坚实基础[19]。

1965年中央专委批准《关于发展我国人造卫星工作规划方案建议》时指出：发展人造卫星以应用卫星为主，应用卫星又以照相卫星为主[20]。1966年5月11—25日，中国科学院提出“以科学实验卫星作为开始和打基础，以测地卫星，特别是返回式卫星为重点，全面开展包括通信、气象、核爆炸、导弹预警、导航等卫星，配成应用卫星的完整体系，进一步在返回式卫星的基础上发展载人飞船”[21]。1967年3—9月，七机部第八设计院完成返回式卫星方案论证报告。早期返回式卫星重1 800千克。1975年11月26日，“长征二号”将返回式卫星送入预定轨道。

返回式卫星分为6种，分别是0型（FSW-0）、1型（FSW-1）、2型（FSW-2）、3型（FSW-3）、4型（FSW-4）和“实践八号”（SJ-8）。FSW-0属于第一代照相遥感卫星，FSW-1属于第一代摄影测绘卫星，FSW-2属于第二代国土普查卫星，FSW-3是第二代地图测绘卫星，FSW-4是国土详查卫星。6种返回式卫星共发射了24颗，取得了明显的经济效益和社会效益，摄影定位能力达到当时的世界先进水平[22]。通过FSW-3、FSW-4的研制，返回式卫星平台和有效载荷不断成熟[23]。该系列卫星还初步具备了空间平台的基本特征。

2.3 通信卫星系列

“东方红一号”卫星发射成功后，有关方面提出研制通信卫星设想[24]。1975年3月，中国卫星通信工程（“331”工程）正式列入国家计划。1983年1月29日，第一颗“东方红二号”试验通信卫星发射。该卫星起飞质量900千克，定点质量420千克，设计寿命3年，装有2台C频段转发器。1984年

4 月 8 日19 时 20 分，第二颗“东方红二号”发射成功。1986 年 2 月1日，第三颗“东方红二号”发射成功。“东方红二号”卫星传输质量超过租用的国际通信卫星。在“东方红二号”基础上，中国又研制了“东方红二号甲”第二代实用通信卫星，转发器数由 2 个增加到 4 个。1988—1991 年“东方红二号甲”共计发射了 4 颗，经济效益和社会效益显著[25]。

1986 年 3 月 31 日，国务院将第三代通信卫星“东方红三号”列为国家重点任务。该卫星重约 2 260 千克，按公用平台思想设计，装有 24 个 C 频段转发器。该卫星采用多项新技术，达到 20 世纪 80 年代国际先进水平[26]。1997 年 5 月 12 日第二颗“东方红三号”卫星（“中卫 6 号”）发射，并于 5 月 20 日定点成功。“中卫 6 号”主要用于电话、数据传输、传真、VSAT 网和电视等项业务。利用“东方红三号”平台，中国还研制了多颗“中星”系列卫星、4颗“天链一号”数据中继卫星、“嫦娥一号”和“嫦娥二号”月球探测器以及“北斗”导航卫星，总计发射卫星 40 余颗。

1998 年，中国开始新一代大型卫星公用平台即“东方红四号”的论证工作，2001 年 1 月完成了预发展任务。“东方红四号”平台最大发射质量 5 200 千克，设计寿命 15 年。“鑫诺二号”通信卫星首次使用该平台，装有 22 路 Ku 频段大功率转发器，发射重量 5 100 千克，设计寿命 15 年。整星指标和能力达到国际先进水平。2006 年 10 月 29 日，“鑫诺二号”卫星发射入轨。利用“东方红四号”卫星平台，中国还研制了“中星”系列通信卫星，也为其他国家和地区通过整星出口方式研制了多颗通信卫星，总数达 30 颗。该平台许多技术指标大大提高，整体性能达到 20 世纪末的国际水平[27]。

21 世纪初，“东方红五号”超大型卫星平台开始研制，其属于大型桁架式平台，发射质量 10 吨，有效载荷 2 000 千克，具有高承载、大功率、长寿命、可扩展等特点。“东方红五号”可装备多达 100 路转发器，设计指标与美国波音公司 BSS702 平台、空客公司 SpaceBus4000 平台处于同一水准，该平台可满足中国 20 年内静止轨道卫星的需求，并且达到了世界先进水平[28]。2017 年 7 月 2 日，该平台以“实践十八号”名义首次发射。

2.4 气象卫星系列

20 世纪 60 年代初，中国已对气象卫星和大气遥感问题进行了初步探索。1969 年 1 月，周恩来在接见中央气象局等单位代表时提出“应该搞我们的气象卫星”。1969 年底，中国气象部门根据周恩来指示，提出气象卫星研制的任务。1970 年 2 月，中共中央、国务院和中央军委下达任务，由上海市组织有关部门开展极轨气象卫星的研制。1977 年 11 月，国防科委将上海航天技术研究院研发的气象卫星命名为“风云一号”。1988 年 9 月 7 日和 1990 年 9 月 3 日，“风云一号”A 星和 B 星相继发射成功，卫星在正常工作期间，许多指标都超过了设计值[29,30]。通过对“风云一号”卫星进行改进，上海航天技术研究院研制了 02 批“风云一号”C、D 两颗卫星，分别于 1999 年 5 月 10 日和 2002 年 5 月 15 日发射成功。20 世纪 90 年代初期，第二代“风云三号”卫星研制工作开始[31]。2008 年 5 月 27 日，第一颗“风云三号”发射升空。截至 2017 年 11 月，“风云三号”共计发射了 4 颗。

第一代静止气象卫星“风云二号”由上海航天技术研究院设计。1987 年 5 月，“风云二号”开始方案设计，研制目标是相当于 20 世纪 90 年代中期国外同类气象卫星的技术水平[32]。“风云二号”发射质量 1 365 千克，定点质量 570 千克。“风云二号”A 星于 1997 年 6 月 10 日发射成功，12 月 1 日交付使用。截至 2018 年 6 月，“风云二号”共计发射了 8 颗卫星。“风云二号”与“风云三号”协同配合，极大地提高了我国气象科学研究与气象预报的能力。“风云四号”是第二代静止气象卫星，充分考虑了海洋

和农业、林业、水利，以及环境、空间科学等领域的需求，实现了综合利用[33,34]。“风云四号”A星于2016年12月12日发射，并在2017年2月定点投入使用。

2.5 资源与遥感卫星

2.5.1 “资源”系列卫星

20世纪70年代末期，中国空间技术研究院开始进行资源卫星论证工作。经过多年探索，最后决定采取国际合作方式研制“资源一号”。1985—1987年，中国空间技术研究院与巴西空间研究院经过互访和磋商，双方愿意共同研制地球资源卫星。1988年7月6日，中巴两国政府签署了《关于核准研制地球资源卫星的协议书》。中巴两国领导人将这次合作誉为“南南高技术领域合作的典范”[35]。1988年8月22日，中巴两国航天部门在北京签署协议书，规定双方联合研制2颗地球资源卫星。“资源一号”（亦称中巴地球资源卫星，CBERS）是中国第一代传输型对地观测卫星，充分吸收了国际先进资源卫星的优点，反映了20世纪90年代初遥感卫星的世界先进水平。卫星总质量1 450千克，所安装的CCD相机、红外多光谱扫描仪和数据传输设备均为中国首次研制。1999年10月14日，“资源一号”01星发射成功。该卫星共发射了5颗，在中国和巴西的经济、科技、文化、教育等领域得到广泛应用。

在中国和巴西合作研制“资源一号”的同时，中国还自行研制了“资源二号”卫星。2000年9月1日“资源二号”首颗卫星发射，2002年10月27日第二颗卫星发射入轨。“资源二号”卫星主要用于国土资源勘查、环境监测与保护、城市规划、农作物估产、防灾减灾和空间科学试验等领域。到2004年11月，“资源二号”共发射了3颗。“资源三号”卫星01星于2012年1月9日成功发射，是我国第一颗民用高分辨率光学传输型测绘卫星。“资源三号”卫星02星于2016年5月30日发射。这两颗“资源三号”卫星用于国家基础测绘、地理国情监测等一系列重大测绘工程任务，服务于经济全球化以及“一带一路”倡议等[36]。

2.5.2 “遥感”系列卫星

上海航天技术研究院和中国空间技术研究院分别研制了“遥感”系列对地观测卫星。“遥感卫星一号”和“遥感卫星二号”分别于2006年4月27日和2007年11月12日发射升空，进入太阳同步轨道。截至2019年5月，“遥感”系列卫星共计发射了30余颗，主要用于国土资源勘查、环境监测、城市规划、农作物估产、防灾减灾和空间科学试验等领域[37]。

2.5.3 高分辨率对地观测系统

2006年，中国将高分辨率对地观测系统（简称“高分系统”）列入《国家中长期科学与技术发展规划纲要》重大专项之一，即“高分专项工程”。“高分专项工程”是一个非常庞大的遥感技术项目，卫星和其他观测平台覆盖了从全色、多光谱到高光谱，从光学到雷达等多种类型，构成了一个具有高空间分辨率、高时间分辨率和高光谱分辨率能力的对地观测系统。“高分一号”和“高分二号”分别于2013年4月26日和2014年8月19日发射成功。截至2018年7月31日，“高分”系列卫星已经发射了10颗[38]。2018年3月31日“高分一号”02、03、04星以“一箭三星”方式发射，标志着我国首个民用高分辨率光学业务星座正式投入使用。“高分系统”预计2020年建成，将为中国现代农业、防灾减灾、资源环境、公共安全等重大领域提供服务，确保中国掌握信息资源自主权，促进形成空间信息产业链[39]。

3 “北斗”导航卫星系统

中国很早就开展了“灯塔一号”导航卫星的探索。20世纪80年代，中国航天界和有关科学家再次提出研制导航卫星的建议，陈芳允和刘志逵[40]提出了双星导航卫星设想。1986年，解放军总参谋部测绘导航

局批准该项目立项进行预研，这就是“北斗一号”导航卫星。卫星采用“东方红三号”卫星平台，搭载导航系统有效载荷。2000 年 10 月31日和 12 月21日，两颗“北斗一号”卫星相继成功发射，2001 年底投入使用，但是“北斗一号”仍是试验性导航系统，难以满足军民用需求。

2006 年底，我国政府决定建立自主的“北斗”全球卫星导航系统（以下简称“‘北斗’系统”）。2007 年 10 月18日，国家航天局发布的《航天发展“十一五”规划》对此予以公布[41]。2009 年11月，国务院常务会议通过《中国第二代卫星导航系统重大专项实施方案》，正式批准建设自主性北斗全球卫星导航系统。“北斗”系统建设分“三步走”实施：第一步建设“北斗一号”试验卫星导航系统；第二步建设“北斗”卫星导航系统，2012 年形成区域覆盖能力；第三步建设“北斗”系统， 2020 年左右形成全球覆盖能力，全球系统包括 5 颗地球静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星[42]。2011 年 12 月 29 日国务院新闻办公室发布的《2011 年中国的航天》白皮书，正式确认中国卫星导航系统发展的“三步走”战略。

2007 年 4 月14日，第一颗“北斗二号”导航卫星发射成功。该卫星采用“东方红三号”A 卫星平台，质量 2 740 千克，载荷能力 360 千克。到 2012 年 10 月，“北斗”导航卫星共计发射了 16 颗。2012 年 12 月 27 日，“北斗”系统正式开始区域导航定位服务，标志着“三步走”战略已经实现了第二步目标[43]。到 2016 年 6 月 12 日，第二代“北斗”卫星共计发射了 23 颗。2017 年 11月5日，第三代导航卫星——“北斗三号”的首批卫星以“一箭双星”方式发射，标志着“北斗”系统第三步建设工作正式开始。“北斗三号”采用“东方红三号”B 卫星平台，质量 4 600 千克，星载原子钟、星座自主运行、卫星载荷、星地链路、星间链路、卫星控制等技术水平大幅提高。新型高精度铷原子钟和氢原子钟综合指标达到国际领先水平[44]。截至 2019 年 5 月 17 日，“北斗三号”卫星共计发射了 21 颗，使“北斗”系统卫星发射总数达 45 颗。预计到 2020 年，“北斗”系统将最终建成。

作为宏大的国家空间信息基础设施，“北斗”系统将为全球军民用户提供陆、海、空导航定位服务，促进卫星定位、导航、授时服务功能的应用。“北斗”系统的普及，将在国民经济建设中发挥巨大作用，并将带来数千亿元的经济效益[45]。

4 中国月球探测工程——“嫦娥工程”

20 世纪 50 年代末，苏联和美国开始了深空探测计划，20 世纪后期欧洲、日本和印度也都在开展深空探测活动。1994 年，中国航天界进行探月活动必要性和可行性的研究，1996 年完成了探月卫星的技术方案研究，1998 年完成了关键技术研究。中国月球探测工程于 2004 年 1 月正式立项，被称作“嫦娥工程”。该工程包括 3 个阶段：绕、落、回[46]。

“嫦娥一号”有效载荷研制测试由中国科学院空间科学与应用研究中心负责，探测器本体由中国空间技术研究院研制。“嫦娥一号”质量 2 350 千克，搭载的科学探测仪器和科学实验设备的有效载荷包括微波探测仪分系统、空间环境探测分系统、有效载荷数据管理分系统[47]。2007 年 10 月 24 日18 时 05 分，“嫦娥一号”成功发射，11 月 7 日“嫦娥一号”进入环绕工作轨道，11 月 20 日开始传回探测数据，经过处理制作完成第一幅月面图像。到 2008 年 11 月7日，“嫦娥一号”在月球轨道成功运行一周年，实现了“嫦娥工程”提出的“精确变轨，成功绕月，有效探测，寿命一年”的预定目标。2008 年 11 月 12 日，根据“嫦娥一号”获取的数据制作完成的“中国第一幅全月球影像图”正式亮相[48]。“嫦娥一号”在轨飞行试验期间，完成了许多重大的科学任务，包括全月面图拍摄、月球表面元素分布、月壤厚度测量、氦-3 资源量

和分布特征评估等。2009年3月1日16时，“嫦娥一号”受控准确落于月球丰富海区域。

2010年10月1日19时许，“嫦娥二号”探测器发射。该探测器包括13个分系统，携带166千克载荷[49]。10月6—9日，“嫦娥二号”卫星共实施了3次近月制动和1次轨道平面机动，轨道近月高度约100公里。“嫦娥二号”在绕月飞行初期，实施了月球背面降轨控制并获取虹湾区高分辨率图像，完成了既定的各项技术试验验证任务。2011年6月9日，“嫦娥二号”飞离月球，飞往日-地拉格朗日L2点。2011年8月，“嫦娥二号”成功到达日-地拉格朗日L2点，开始进行科学探测。2012年4月，“嫦娥二号”成功绕飞日-地拉格朗日L2点，开展了10个月的科学探测，填补了中国对地球远磁尾区域的离子能谱、太阳耀斑爆发和宇宙伽马爆的科学探测的空白[50]。2011年12月15日，“嫦娥二号”飞抵距地球约700万公里远的深空。在后续飞行时，先后创造距离地球2 000万公里、5 000万公里和1亿公里的中国探测器新纪录[51]。

“嫦娥三号”的任务是在月球实现软着陆，由月球软着陆探测器和月面巡视探测器（“玉兔号”月球车）组成。2013年12月2日，“嫦娥三号”发射升空，并于14日成功软着陆于月球雨海西北部，15日完成着陆器与巡视器分离，并陆续开展月球科学探测和其他预定任务。其工程目标除了首次实现月面软着陆外，还将开展一系列科学探测任务，包括首次运行月球车[52]。12月15日，“嫦娥三号”着陆器与“玉兔号”月球车分离，“玉兔号”顺利驶抵月球表面。“玉兔号”围绕“嫦娥三号”旋转拍照，并传回照片。探测器与“玉兔号”在月面多次入眠与唤醒，实现了着陆器月面安全工作一年的预定工程目标[53]。2016年4月，“嫦娥三号”拍摄的月面高分辨率全彩色照片首次公布，给全世界科学家研究月球提供了第一手资料[54]。

“嫦娥四号”于2018年12月8日发射，并于2019年1月3日成功登陆月球背面，这是世界上第一个在月球背面软着陆的月球探测器，具有重要意义[55]。2019年1月11日，“嫦娥四号”着陆器与“玉兔二号”月球车正常工作，在“鹊桥号”中继卫星支持下顺利完成互拍，地面接收图像清晰完好。探测器上搭载的中外科学载荷工作正常，搭载科学实验项目顺利开展，达到工程既定目标。1月15日，“嫦娥四号”完成人类首次月面生物实验。着陆器和“玉兔二号”月球车经过多次休眠和自主唤醒，开展了大量拍摄、观察和研究任务[56]。2019年2月15日，中国国家航天局和国际天文学联合会联合发布“嫦娥四号”月球地理实体命名，将“嫦娥四号”着陆点命名为“天河基地”，将着陆点周围3个小环形山分别命名为“织女”“河鼓”和“天津”，将着陆点所在冯·卡门环形山的中央峰命名为“泰山”。“嫦娥”系列4个探测器获得的成功，预示着“嫦娥五号”月球采样探测器的发射已经为期不远。

5 载人航天工程

载人航天是20世纪60年代人类航天事业发展的重大成就，人类从首次进入太空到实现载人登月只用了8年时间。受当时世界载人航天热潮的影响，中国很早就开始了载人航天探索，制定“714”载人航天计划，提出研制“曙光号”载人飞船。计划执行期间，七机部在飞船设计、结构实验、宇航员选拔训练、航天医学等领域取得了一些成果[57]。1992年，中国载人航天工程正式立项，并于2003年实现了载人航天的目标。中国成为世界上第三个具备独立载人航天飞行能力的国家。按照载人航天工程“三步走”发展战略，中国已经完成前两步任务，即实现宇航员首次太空飞行、运行空间实验室，第三步空间站建设的序幕也已拉开。

“863”计划实施后，国防科工委和航天工业部等

单位对中国航天技术的长远发展进行了研究和规划，其中在载人航天领域对空间站、航天飞机以及载人飞船进行了广泛研究与论证[58-60]。1992 年 9 月 21 日，中央政治局扩大会议正式批准中国载人航天工程（“921”工程）立项实施。1994 年，载人飞船被命名为“神舟号”。

“神舟号”飞船由戚发轫任总设计师，研制目的是：为突破关键技术，掌握载人航天基本技术和航天医学工程基础知识进行演示验证；进行 2 个航天器交会对接和宇航员出舱活动等试验；作为空间站的运输器，为其运送宇航员和物资；停靠在空间站上作为应急救生船；开展空间应用和科学试验；积累载人飞行经验等。“神舟号”采用三舱一段（轨道舱、返回舱、推进舱和附加段）构型，设计方案在某些方面优于国外第三代载人飞船[59]。“神舟号”飞船长约 9 米，质量 7.8 吨，最大直径 2.9 米。为保障宇航员安全，“神舟号”飞船采用逃逸塔救生系统，该系统进行过多次逃逸救生试验[61]。

1999 年 11 月 20 日，“神舟一号”进行首次发射试验，取得了成功。到 2002 年 12 月，“神舟二号”“神州三号”和“神州四号”相继发射试验成功。4 次不载人飞行试验不仅对飞船系统、运载火箭系统、返回着陆系统、测控系统进行了全面考核，同时还开展了大量空间科学实验。从系统上讲，中国飞船在可靠性方面处于世界领先地位[62]。

“神舟五号”是中国第一艘载人飞船，其主要任务是：① 完成首次载人飞行试验；② 为宇航员提供必要的生活与工作条件；③ 为有效载荷提供相应的试验条件；④ 确保宇航员和有效载荷安全返回地面；⑤ 飞行过程保证宇航员的生命安全；⑥ 飞船的轨道舱留轨进行空间应用实验。“神舟五号”进行了 39 处提高可靠性的改进和 20 处提高安全性的改进，做了大量试验，对 123 种故障模式设计了对策[63]。2003 年 10 月 15 日 9 时，“长征二号 F”火箭将“神舟五号”飞船发射升空，杨利伟成为中国执行首次载人航天飞行任务的宇航员。在飞行过程中，杨利伟除对飞船进行检查和操作外，还正常进行了饮食和睡眠并完成了其他各项工作。10 月 16 日 6 时 23 分，“神舟五号”飞船返回舱在内蒙古主着陆场成功着陆，“神舟五号”总计飞行时间 21 小时，绕地球 14 圈。至此，中国首次载人航天飞行圆满成功，这是中国航天发展史上一座新的里程碑，中华民族古老的飞天之梦终于得以实现[64]。

2005 年 10 月 12 日“神舟六号”载人飞船发射升空，执行此次飞行任务的宇航员是费俊龙和聂海胜。飞船新增加了 40 余台设备和 6 个软件，做了 10 余项技术改进[65]。“神舟六号”飞行过程中，开展了变轨、轨道保持等操作，还进行了大量科学实验。2008 年 9 月 25 日“神舟七号”载人飞船发射升空并于 9 月 28 日成功返回，共计飞行了 2 天 20 小时 27 分钟，执行此次飞行任务的宇航员是翟志刚（指令长）、刘伯明和景海鹏。此次飞行过程最重要的任务是实施中国宇航员首次出舱活动，突破和掌握出舱活动相关技术[66]。2008 年 9 月 27 日 16 点 30 分，翟志刚出舱作业，刘伯明在轨道舱内协助，翟志刚舱外活动时间约 20 分钟。“神舟七号”实现了中国人第一次太空漫步，具有划时代的意义，对深化载人航天、完善飞行控制、积累交会对接经验具有重要意义。

载人航天工程第二阶段工作从发射“天宫一号”空间实验室开始，一方面对实验室进行考核并开展空间科学实验室，另一方面完成“神舟号”飞船与其交会对接任务。“天宫一号”是中国第一个空间实验室，全长 10.4 米，质量 8.5 吨，由实验舱和资源舱构成。2011 年 9 月 29 日，“天宫一号”发射入轨。2011 年 11 月 1 日“神舟八号”发射，并与“天宫一号”成功实施两次自动交会对接。“神舟八号”与“天宫一号”交会对接成功，完成了中国载人航天技术的又一重大突破[67]。

2012 年 6 月 16—29 日，“神舟九号”飞船完成中国第 4 次航天飞行，执行飞行任务的宇航员分别是景海鹏（指令长）、刘旺、刘洋，其中刘洋是中国第一位女性宇航员。6 月 18 日 14 时，“神舟九号”与“天宫一号”完成自动交会对接。对接完成后，宇航员于 6 月 17 时 22 分进入“天宫一号”进行工作。6 月 24 日 12 时 55 分，“神舟九号”与“天宫一号”手动交会对接成功。此次飞行，为中国空间站建设突破了一道技术难关[68]。2013 年 6 月 11—26 日，“神舟十号”飞船完成了中国第 5 次载人航天飞行，执行此次飞行任务的宇航员是聂海胜（指令长）、张晓光、王亚平。6 月 13 日，飞船与“天宫一号”自动交会对接。完成的主要任务有：为“天宫一号”提供人员和物资往返运输服务；进一步考核交会对接系统；进一步考核航天器对宇航员生活、工作和健康的保障能力；进行宇航员空间环境适应性和操作工效研究，开展空间科学实验、航天器维修试验和空间站关键技术验证；开展面向青少年的太空科学讲座科普教育活动等。王亚平在聂海胜和张晓光配合下开展的太空科普教育活动，引起了强烈反响[69]。宇航员返回后，地面人员继续利用“天宫一号”开展空间科学与技术试验，为空间站建设运营和载人航天成果的应用推广积累了经验。

“天宫二号”除用于进一步验证交会对接技术外，还将开展一系列空间试验，包括地球观测和空间地球系统科学、空间应用新技术、空间技术和航天医学等领域的应用和试验[70]。2016 年 9 月 15日“天宫二号”发射入轨。10 月 17 日，“神舟十一号”飞船发射，执行此次飞行的宇航员是景海鹏（指令长）和陈冬。飞行的主要任务是：为“天宫二号”运行提供人员和物资往返运输服务；考核交会对接和飞船返回技术；与“天宫二号”对接形成组合体，进行中期驻留验证；考核组合体对宇航员生活、工作和健康的保障能力；开展航天医学、空间科学实验；在轨维修技术试验以及科普活动。10 月19 日，飞船与“天宫二号”对接后，景海鹏、陈冬进入“天宫二号”并开展了大量空间科学实验和技术试验、对地观测工作。11月18 日，宇航员乘飞船安全返回地面。此次飞行创造了中国载人航天飞行最长时间纪录，达 33 天[71]。

2017 年 4 月20日，第一艘货运飞船“天舟一号”发射，并于 4 月 22 日与“天宫二号”对接成功。“天舟一号”长约 10.6 米，质量 13.5 吨，载货能力 6.5 吨，开展了新型元器件在轨验证、空间环境探测、力学环境测量、生命科学研究等方面 13 项任务。“天舟一号”突破了货物运输、推进剂补加、快速对接等关键技术，其研制、发射与运行，是我国载人航天工程“三步走”发展战略第二步目标成功实现的标志，预示着空间站时代即将开启[72]。

6 结语：中国航天发展的历史经验

自 1956 年开始，经过 63 年的不懈努力，中国航天技术得到了长足的发展。“长征”系列火箭已具备各类轨道、各种质量和各类航天器的综合发射能力，入轨精度达到国际先进水平，近地轨道运载能力达到 25 吨，地球同步转移轨道运载能力达到 14 吨，太阳同步轨道运载能力达到 15 吨。中国卫星覆盖了科学、通信、气象、资源、遥感、导航等主要领域，许多单项技术已达到世界先进水平。中国发射的卫星总数居世界第三位，截至 2018 年 11 月 30 日，在轨工作卫星 283 颗，仅次于美国（849 颗）居世界第二位，比第三位俄罗斯（152 颗）多 130 余颗。中国不仅独立开展了月球探测活动，独立实施了载人航天工程、独立建设了全球导航卫星系统，还将建设具有长期运行能力的空间站。中国正从航天大国迈向航天强国。

导弹与航天事业的发展始终得到国家的高度重视。在集中统一的体制下，导弹与航天事业在极其困难的情况下起步，逐步从无到有、从弱到强发展起来。中国航天事业发展的主要经验初步总结如下：① 党和政府高度重视。中国导弹与航天技术发展始终

是在党和政府高度重视下发展壮大的，毛泽东、周恩来等党和国家领导人一直非常关心导弹与航天发展，即使在困难时期也给予大力支持。② 强有力的领导体制。随着以“两弹一星”为标志的中国国防科技的深入发展，中国航天形成了以最高层的中央专门委员会到国防科委（国防科工委）、七机部（航天工业部）、型号研究院这种自上而下的决策、管理和研制体制，上下通畅，管理严密，领导有力，这是中国航天事业取得一系列重大突破的组织保障。③ 始终瞄准国家重大战略需要。中国航天事业起源于战略导弹计划，当时主要目标是发展各类战略导弹，为国防建设服务。随着导弹事业取得重大进展，运载火箭、人造卫星计划应运而生，并且扎实推进，军民密切结合，为国防建设、国民经济与社会发展作出了巨大贡献。④ 坚持自力更生，独立研制。1956年10月国防部五院建立时，就提出了“采取自力更生为主，力争外援和利用资本主义国家已有的科学成果为辅的方针”。中国航天事业的发展长期贯彻这一方针政策，使中国航天在技术上主要是自主创新，对国外的依赖较少。⑤ 坚持以型号带科研的策略。通过发展急需的导弹武器，我国逐步建立起完整的科研、设计、生产与试验体系，带动了相关学科的建立和发展。⑥ 选择有限目标，突出重点。在发展导弹过程中，各阶段研制目标非常明确；在应用卫星方面，根据需求和技术能力，选择有限目标，突出重点，扎实推进，最终获得累进式技术突破。⑦ 以科技规划指导型号研制。在航天技术发展各个阶段，都制定了细致的发展规划，明确重点任务，明确总体发展思路，规划了中长期重点任务，有利于集中力量取得重点突破。⑧ 动用全国资源，开展大协作。中国导弹与航天事业发展的各个时期，都得到了其他部门和地方政府的支持和协助，“大力协同”是重要发展经验之一。⑨ 创造性地运用系统工程管理。在以钱学森为代表的航天专家大力倡导下，中国导弹与航天器研制大力运用系统工程管理理念和技术，创造了以“总体设计部”为核心的系统工程管理模式，对航天大科学工程的顺利实施具有重要意义。⑩ 充分利用后发优势。苏联和美国早期航天发展远远领先于我国。中国充分利用后发优势，广泛吸收借鉴发达国家的已有成果和经验，使航天发展在技术上少走了很大弯路。改革开放后，中国积极探索各类各层次国际合作，不仅提高了技术水平和管理经验，也获得了良好的国际声誉。

参考文献

1 谢光. 当代中国的国防科技事业. 北京: 当代中国出版社, 1995: 247.

2 张钧. 当代中国的航天事业. 北京: 中国社会科学出版社, 1986: 71-80.

3 吴开林. 遥感卫星返回大地// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 344-358.

4 朱森元, 朱尧铨. 氢氧发动机的诞生// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 427-434.

5 吴瑞华, 顾瑞安. 世界航天运载器大全. 北京: 中国宇航出版社, 1996: 117-150.

6 陆正廷, 王德鸿. 上海航天志. 上海: 上海社会科学院出版社, 1997: 214.

7 范世合. 长征三号的研制与外星发射// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 480-488.

8 王德臣. 长二捆的诞生// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 392-400.

9 龙乐豪. 迈向新世纪的长征三号甲系列火箭// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 489-498.

10 李东, 王钰, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术. 导弹与航天运载技术, 2017, (3): 1-5.

11 陈龙. 长征六号成功首飞 实现一箭20星. 中国航天, 2015, (10): 8.

12 中国运载火箭技术研究院. 长征七号火箭可靠性达国际领先水平. [2016-06-28]. http://calt.spacechina.com/n482/n743/

c5772/content.html.

13 姚天宇. “快箭” 长征十一号首飞成功 可实现24小时内发射. 中国航天, 2015, (19): 9.

14 张永维. 中国科学与技术试验卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 31-38.

15 蔡金荣, 张立荣, 周晓东. 实践系列卫星空间环境探测的回顾// 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十九次学术会议论文集（上册）. 北京: 中国空间科学学会空间探测专业委员会, 2006: 423-427.

16 张永维, 袁仕耿. 中国的地球空间双星探测计划. 中国航天, 2008, (5): 12-17.

17 陈有梅. 墨子精神的传承——量子卫星诞生记. 卫星与网络, 2018, (6): 36-37.

18 张志会, 马连轶. “墨子号” 量子科学实验卫星大科学工程的历史与管理模式探究. 中国科技论坛, 2018, (11): 1-8.

19 李大耀, 钱文耀. 走有中国特色的道路, 创建举世瞩目的业绩——中国航天器及其技术进展综述// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 1-21.

20 吴开林. 遥感卫星返回大地// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 344-358.

21 陆绶观. 中国第一颗人造地球卫星的诞生// 罗荣兴. 请历史记住他们: 中国科学院与“两弹一星”. 广州: 暨南大学出版社, 1999: 336-354.

22 闵桂荣, 林华宝. 中国返回式卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 39-48.

23 唐伯昶. 中国返回式卫星遥感和科学试验的回顾与展望. 中国航天, 2001, (4): 3-8.

24 张云彤. 中国卫星通信工程的第一颗明珠// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 336-343.

25 王家胜. 中国通信卫星的回顾与展望. 中国航天, 2001, (3): 9-13.

26 戚发轫. 通信卫星技术及应用// 刘纪原. 航天技术与现代化. 北京: 中国宇航出版社, 1991: 191-199.

27 刘军. 臻于至善的东方红四号卫星平台. 卫星电视与宽带多媒体, 2013, (8): 31-34.

28 唐勇. 东方红五号卫星平台研制获突破性进展. 军民两用技术与产品, 2014, (7): 17.

29 陆正廷, 王德鸿. 上海航天志. 上海: 上海社会科学院出版社, 1997: 256.

30 孟执中. 从试验卫星到业务应用卫星——中国太阳同步轨道气象卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 64-73.

31 董超华, 张文建, 杨军. 我国第二代极轨气象卫星——风云三号// 第十五届全国遥感技术学术交流会论文摘要集. 北京: 中国地理学会, 2005: 41-42.

32 李卿. 风云二号总师谈风云二号. 中国航天, 2000, (8): 6-9.

33 李卿. 立足国内, 走继承创新之路: 中国地球静止气象卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 74-81.

34 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望. 上海航天, 2016, (2): 1-8.

35 陈宜元. 资源一号发射成功标志着我国空间技术实现了新的飞跃. 中国航天, 2000, (3): 21-28.

36 唐新明, 王鸿燕. 资源三号卫星应用分析与展望. 航天器工程, 2016, (10): 1-9.

37 李淑姮. 长二丙运载火箭成功发射遥感三十号04组卫星. 中国航天, 2018, (2): 27.

38 童旭东. 扎实推进高分专项实施 助力“一带一路”建设. 航天返回与遥感, 2018, (8): 19-25.

39 曹福成. 高分系列遥感卫星 布设中国太空“慧眼”——我国高分专项建设回眸. 中国军转民, 2015, (1): 28-33.

40 陈芳允, 刘志逵. 发展我国的星基定位通信系统. 中国空间科学技术, 1987, (3): 1-7.

41 国防科工委. 国防科工委公布《航天发展“十一五”规划》（全文）. [2007-10-18]. http://www.gov.cn/gzdt/2007-

10/18/content_779281.htm.
42 李罡, 王志明, 吕晶. 我国卫星导航定位系统简介. 军事通信技术, 2009, (4): 94-97.
43 冉承其. 北斗卫星导航系统的发展. 卫星应用, 2013, (7): 4-7.
44 宗体. 创新跨越 新一代北斗导航卫星关键技术得到验证——专访北斗导航卫星总设计师谢军. 国际太空, 2015, (12): 1-4.
45 冉承其. 北斗卫星导航系统运行与发展. 卫星应用, 2017, (8): 11-13.
46 吴伟仁. 奔向月球. 北京: 中国宇航出版社, 2007: 20.
47 欧阳自远, 温伟斌, 边伟, 等. 嫦娥一号卫星的科学探测// 中国空间科学学会第七次学术年会文集. 大连: 中国空间科学学会, 2009: 68-82.
48 邹红霞. 嫦娥一号全月面三维立体图自动构建技术通过鉴定. 装备指挥技术学院学报, 2009, (4): 80.
49 陈全育. 嫦娥二号任务的六大技术创新与突破. 中国航天, 2010, (10): 6.
50 黄江川. 嫦娥二号卫星技术成就与展望// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集（上册）. 北京: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2012.
51 叶培建, 黄江川, 张廷新, 等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望.中国科学： 技术科学, 2013, (5): 467-477.
52 张巧玲. “嫦娥三号”任务及其初步科学成果. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 85-90.
53 申振荣, 张伍, 贾阳, 等. 嫦娥三号巡视器及其技术特点分析. 航天器工程, 2015, (10): 8-13.
54 郭奕彤, 刘海英, 紫晓. 自主创新树典范 嫦娥工程结硕果——嫦娥三号探测器探月任务创新成果回眸. 中国航天, 2014, (9): 3-7.
55 欧阳自远. 嫦娥四号月背软着陆的重大意义. 世界科学, 2019, (3): 28-30.
56 叶培建, 孙泽洲, 张熇, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计. 中国科学： 技术科学, 2019, 49(2): 124-137.
57 舒云. 内幕纪实——把中国宇航员送上太空. 北京文学, 2001, (11): 1-45.
58 石磊. 神箭搏苍穹——航天科技. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 305.
59 戚发轫. 神舟号载人飞船研制工作首次取得阶段性重大突破——中国载人飞船的进展简况// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 27-30.
60 李成智. 中国载人航天工程决策过程中航天飞机与载人飞船之争. 科技导报, 2009, (18): 19-27.
61 王永志, 孙功凌. 载人航天工程// 宋健. 中国科学技术前沿（1999/2000）. 北京: 高等教育出版社, 2000: 3-40.
62 石磊. 神箭搏苍穹——航天科技. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 314.
63 肖名鑫, 张柏楠, 程卓. 可靠性技术在神舟五号载人飞船上的应用. 航天器工程, 2004, (12): 4-10.
64 戚发轫, 张柏楠, 郑松辉, 等. 神舟五号载人飞船的研制与飞行结果评价. 航天器工程, 2004, (3): 1-14.
65 秦文波. 神舟六号载人飞船及其技术改进. 上海航天, 2005, (10): 1-5.
66 尚志, 张柏楠, 潘腾, 等. 神舟七号出舱活动飞船研制综述. 载人航天, 2009, (2): 16-48.
67 周建平. 天宫一号/神舟八号交会对接任务总体评述. 载人航天, 2012, (1): 1-5.
68 柏合民. 神舟九号天宫之旅的任务与意义. 科学, 2012, (9): 1-3.
69 俞盈帆. 神舟十号载人飞船. 卫星应用, 2013, (7): 72.
70 邓薇. 天宫二号——中国首个真正意义上的空间实验室. 卫星应用, 2016, (10): 81-82.
71 本刊编辑部, 洪鸿, 易靖茗, 等. 神舟十一号载人飞船全程回顾. 台声, 2016, (12): 36-38.
72 白明生, 金勇, 雷剑宇, 等. 天舟一号货运飞船研制. 载人航天, 2019, (2): 249-255.

Breakthroughs in China's Space Technology

LI Chengzhi

(Institute for Advanced Studies in Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In this paper, the auther reviews the development of space technology in China since the 1970's, including the series development of launch vehicles, scientific satellites, recoverable satellites, communications satellites, meteorological satellites, resources and remote sensing satellites, the progress of BeiDou Navigation Satellite System, Chang'e Lunar Exploration Program, and the Manned Space Program. At the end of the paper, the historical experience of China's space technology development is summarized.

Keywords space technology, technological development, experience, China



李成智 北京航空航天大学人文社会科学高等研究院教授。中国科学技术史学会常务理事，北京自然辩证法研究会副理事长。主要研究领域包括：科学技术史、航空航天史、科技政策与管理等。E-mail: lichengzhi@263.net

LI Chengzhi Professor at Institute for Advanced Studies in Humanities and Social Sciences, Beihang University. He is an executive council member of the Chinese Society for the History of Science and Technology, Vice President of Beijing Society for Philosophy of Nature, Science and Technology. His main research fields include history of science and technology, history of aerospace, policy and management of science and technology. E-mail: lichengzhi@263.net

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 谢光. 当代中国的国防科技事业. 北京: 当代中国出版社, 1995: 247.

Xie G. National Defense Science and Technology in Contemporary China. Beijing: China Social Sciences Press, 1992. (in Chinese)

2 张钧. 当代中国的航天事业. 北京: 中国社会科学出版社, 1986: 71-80.

Zhang J. Aerospace Industry in Contemporary China. Beijing: China Social Sciences Press, 1986. (in Chinese)

3 吴开林. 遥感卫星返回大地// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 344-358.

Wu K L. Remote sensing satellite returns to earth// Wang L H. Achievement of China's Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 344-358. (in Chinese)

4 朱森元, 朱尧铨. 氢氧发动机的诞生// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 427-434.

Zhu S Y, Zhu Y Q. The birth of the hydrogen-oxygen engine// Wang L H. Achievement of China's Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 427-434. (in Chinese)

5 吴瑞华, 顾瑞安. 世界航天运载器大全. 北京: 中国宇航出版社, 1996: 117-150.

Wu R H, Gu R A. Encyclopedia of World Space Vehicles. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1996: 117-150. (in Chinese)

6 陆正廷, 王德鸿. 上海航天志. 上海: 上海社会科学院出版社, 1997: 214.

Lu Z T, Wang D H. Shanghai Aerospace Chronicle. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press, 1997: 214. (in Chinese)

7 范世合. 长征三号的研制与外星发射// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 480-488.

Fan S H. Research and development of Long March-3 and sent the satellite into space// Wang L H. Achievement of China's Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 480-488. (in Chinese)

8 王德臣. 长二捆的诞生// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 392-400.

Wang D C. The birth of CZ-2E// Wang L H. Achievement of China's Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 392-400. (in Chinese)

9 龙乐豪. 迈向新世纪的长征三号甲系列火箭// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 489-498.

Long L H. The Long March-3A series of rockets heading for the new century// Wang L H. Achievement of China's Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 489-498. (in Chinese)

10 李东, 王珏, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术. 导弹与航天运载技术, 2017, (3): 1-5.

Li D, Wang J, He W, et al. The general scheme and key technologies of CZ-5 launch vehicle. Missiles and Space Vehicles, 2017, (3): 1-5. (in Chinese)

11 陈龙. 长征六号成功首飞 实现一箭20星. 中国航天, 2015, (10): 8.

Chen L. Long March-6 successfully made its maiden flight, and realize the dream of 20 stars with one arrow. Aerospace China, 2015, (10): 8. (in Chinese)

12 中国运载火箭技术研究院. 长征七号火箭可靠性达国际领先水平. [2016-06-28]. http://calt.spacechina.com/n482/n743/c5772/content.html.

China Academy of Launch Vehicle Technology. The reliability of the Long March-7 rocket has reached the international leading level. [2016-06-28]. http://calt.spacechina.com/n482/n743/c5772/content.html. (in Chinese)

13 姚天宇. “快箭”长征十一号首飞成功 可实现24小时内发

射. 中国航天, 2015, (10): 9.
Yao T Y. Quick Arrow Long March-11 made its maiden flight and can be launched within 24 hours. Aerospace China, 2015, (10): 9. (in Chinese)
14 张永维. 中国科学与技术试验卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 31-38.
Zhang Y W. Progress of China science and technology experiment satellite// Wang X J. The Progress of Chinese Spacecraft Technology in the 20th Century. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2002: 31-38. (in Chinese)
15 蔡金荣, 张立荣, 周晓东. 实践系列卫星空间环境探测的回顾// 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十九次学术会议论文集（上册）. 北京: 中国空间科学学会空间探测专业委员会, 2006: 423-427.
Cai J R, Zhang L R, Zhou X D. Review of space environment exploration of practice series satellite// Proceedings of the 19th Academy Meeting of Space Exploration Professional Committee of China Space Science Society (Volume I). Beijing: Space Exploration Professional Committee of China Space Science Society, 2006: 423-427. (in Chinese)
16 张永维, 袁仕耿. 中国的地球空间双星探测计划. 中国航天, 2008, (5): 12-17.
Zhang Y W, Yuan S G. The geospatial double star exploration program of China. Aerospace China, 2008, (5): 12-17. (in Chinese)
17 陈有梅. 墨子精神的传承——量子卫星诞生记. 卫星与网络, 2018, (6): 36-37.
Chen Y M. Inheritance of Mozi Spirit—The birth of quantum satellite. Satellite & Network, 2018, (6): 36-37. (in Chinese)
18 张志会, 马连轶. “墨子号”量子科学实验卫星大科学工程的历史与管理模式探究. 中国科技论坛, 2018, (11): 1-8.
Zhang Z H, Ma L Y. The management mode on how Chinese large science projects transiting from tracking class to leading class in the world: Taking quantum satellite project as an example. Forum on Science and Technology in China, 2018, (11): 1-8. (in Chinese)
19 李大耀, 钱文耀. 走有中国特色的道路, 创建举世瞩目的业绩——中国航天器及其技术进展综述// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 1-21.
Li D Y, Qian W Y. Take the road with Chinese characteristics and create world-renowned achievements—A review of Chinese spacecraft and its technological progress// Wang X J. The Progress of Chinese Spacecraft Technology in the 20th Century. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2002: 1-21. (in Chinese)
20 吴开林. 遥感卫星返回大地// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 344-358.
Wu K L. Remote sensing satellite returns to earth// Wang L H. Achievement of China’s Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 344-358. (in Chinese)
21 陆绶观. 中国第一颗人造地球卫星的诞生// 罗荣兴. 请历史记住他们: 中国科学院与“两弹一星”. 广州: 暨南大学出版社, 1999: 336-354.
Lu S G. The birth of China’s first artificial earth satellite// Luo R X. Please Remember Them in History: Chinese Academy of Sciences and “Two Bombs and One Satellite”. Guangzhou: Jinan University Press, 1999: 336-354. (in Chinese)
22 闵桂荣, 林华宝. 中国返回式卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 39-48.
Min G R, Lin H B. The progress of China’s returnable satellites// Wang X J. The Progress of Chinese Spacecraft Technology in the 20th Century. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2002: 39-48. (in Chinese)
23 唐伯昶. 中国返回式卫星遥感和科学试验的回顾与展望.

中国航天, 2001, (4): 3-8.

Tang B C. Review and prospect of China's returning satellite remote sensing and scientific experiments. Aerospace China, 2001, (4): 3-8. (in Chinese)

24 张云彤. 中国卫星通信工程的第一颗明珠// 王礼恒. 中国航天腾飞之路. 北京: 中国文史出版社, 1999: 336-343.

Zhang Y T. The first pearl of China's satellite communication project// Wang L H. Achievement of China's Space Industry. Beijing: China Literature and History Publishing House, 1999: 336-343. (in Chinese)

25 王家胜. 中国通信卫星的回顾与展望. 中国航天, 2001, (3): 9-13.

Wang J S. Review and prospect of Chinese communication satellites. Aerospace China, 2001, (3): 9-13. (in Chinese)

26 戚发轫. 通信卫星技术及应用// 刘纪原. 航天技术与现代化. 北京: 中国宇航出版社, 1991: 191-199.

Qi F R. Communication satellite technology and its application// Liu J Y. Space Technology and Modernization. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1991: 191-199. (in Chinese)

27 刘军. 臻于至善的东方红四号卫星平台. 卫星电视与宽带多媒体, 2013, (15): 31-34.

Liu J. Perfection of the Dongfanghong-4 satellite platform. Satellite TV & IP Multimedia, 2013, (15): 31-34. (in Chinese)

28 唐勇. 东方红五号卫星平台研制获突破性进展. 军民两用技术与产品, 2014, (8): 17.

Tang Y. The development of the Dongfanghong-5 satellite platform has made a breakthrough. Dual Use Technologies & Products, 2014, (8): 17. (in Chinese)

29 陆正廷, 王德鸿. 上海航天志. 上海: 上海社会科学院出版社, 1997: 256.

Lu Z T, Wang D H. Shanghai Aerospace Chronicle. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press, 1997: 256. (in Chinese)

30 孟执中. 从试验卫星到业务应用卫星——中国太阳同步轨道气象卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 64-73.

Meng Z Z. From experimental satellites to operational application satellites—The progress of China's polar orbit meteorological satellite// Wang X J. The Progress of Chinese Spacecraft Technology in the 20th Century. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2002: 64-73. (in Chinese)

31 董超华, 张文建, 杨军. 我国第二代极轨气象卫星——风云三号// 第十五届全国遥感技术学术交流会论文摘要集. 北京: 中国地理学会, 2005: 41-42.

Dong C H, Zhang W J, Yang J. China's second-generation polar orbit meteorological satellite—Fengyun-3// Collection of Abstracts of Papers of the 15th National Conference on Remote Sensing Technology. Beijing: The Geographical Society of China, 2005: 41-42. (in Chinese)

32 李卿. 风云二号总师谈风云二号. 中国航天, 2000, (8): 6-9.

Li Q. Chief engineer of FY-2 talks about FY-2. Aerospace China, 2000, (8): 6-9. (in Chinese)

33 李卿. 立足国内，走继承创新之路：中国地球静止气象卫星的进展// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 74-81.

Li Q. Based on China, taking the road of inheritance and innovation: the progress of China's static weather satellite// Wang X J. The Progress of Chinese Spacecraft Technology in the 20th Century. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2002: 74-81. (in Chinese)

34 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望. 上海航天, 2016, 33(2): 1-8.

Dong Y H. FY-4 meteorological satellite and its application prospect. Aerospace Shanghai, 2016, 33(2): 1-8. (in Chinese)

35 陈宜元. 资源一号发射成功标志着我国空间技术实现了新的飞跃. 中国航天, 2000, (3): 21-28.

Chen Y Y. The successful launch of ZY-1 marks a new leap in

China’s space technology. Aerospace China, 2000, (3): 21-28. (in Chinese)

36 唐新明, 王鸿燕. 资源三号卫星应用分析与展望. 航天器工程, 2016, 25(5): 1-10.

Tang X M, Wang H Y. Analysis and prospect of application of ZY-3 satellite. Spacecraft Engineering, 2016, 25(5): 1-10. (in Chinese)

37 李淑姮. 长二丙运载火箭成功发射遥感三十号04组卫星. 中国航天, 2018, (2): 27.

Li S H. Long March-2C rocket launcher successfully launched a satellite, Yaogan 30-04 group.. Aerospace China, 2018, (2): 27. (in Chinese)

38 童旭东. 扎实推进高分专项实施 助力“一带一路”建设. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 18-25.

Tong X D. Solidly promote the implementation of high-scoring special projects to help the construction of the “Belt and Road”. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4): 18-25. (in Chinese)

39 曹福成. 高分系列遥感卫星 布设中国太空“慧眼”——我国高分专项建设回眸. 中国军转民, 2015, (1): 28-33.

Cao F C. High-resolution remote sensing satellite set up China’s space “wisdom eye”—A review of China’s special construction of high-resolution. Defence Industry Conversion in China, 2015, (1): 28-33. (in Chinese)

40 陈芳允, 刘志逵, 冯汝明, 等. 发展我国的星基定位通信系统. 中国空间科学技术, 1987, (3): 1-7.

Chen F Y, Liu Z K, Feng R M, et, al. The development of satellite position determination and communication system. Chinese Space Science and Technology, 1987, (3): 1-7. (in Chinese)

41 国防科工委. 国防科工委公布《航天发展“十一五”规划》（全文）. [2007-10-18]. http://www.gov.cn/gzdt/2007-10/18/content_779281.htm.

The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the People’s Republic of China. The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the People’s Republic of China announced *the Eleventh Five-Year Plan of Space Development* (full text). [2007-10-18]. http://www.gov.cn/gzdt/2007-10/18/content_779281.htm. (in Chinese)

42 李罡, 王志明, 吕晶. 我国卫星导航定位系统简介. 军事通信技术, 2009, (4): 94-97.

Li G, Wang Z M, Lyu J. Summary of satellite navigation positioning system in China. Journal of Military Communications Technology, 2009, (4): 94-97. (in Chinese)

43 冉承其. 北斗卫星导航系统的发展. 卫星应用, 2013, (4): 4-7.

Ran C Q. The development of BeiDou Navigation Satellite System. Satellite Application, 2013, (4): 4-7. (in Chinese)

44 宗体. 创新跨越 新一代北斗导航卫星关键技术得到验证——专访北斗导航卫星总设计师谢军. 国际太空, 2015, (12): 1-4.

Zong T. New generation of BeiDou navigation satellite key technologies verified: An interview with Xie Jun. Space International, 2015, (12): 1-4. (in Chinese)

45 冉承其. 北斗卫星导航系统运行与发展. 卫星应用, 2016, (6): 13-16.

Ran C Q. Operation and development of BeiDou Navigation Satellite System. Satellite Application, 2016, (6): 13-16. (in Chinese)

46 吴伟仁. 奔向月球. 北京: 中国宇航出版社, 2007: 20.

Wu W R. To the Moon. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2007: 20. (in Chinese)

47 欧阳自远, 温伟斌, 边伟, 等. 嫦娥一号卫星的科学探测//中国空间科学学会第七次学术年会文集. 大连: 中国空间科学学会, 2009: 68-82.

Ouyang Z Y, Wen W B, Bian W, et al. Scientific exploration of Chang’e-1 lunar satellite// Proceedings of the Seventh

Annual Academic Conference of the Chinese Society of Space Research. Dalian: Chinese Society of Space Research, 2009: 68-82. (in Chinese)

48 邹红霞. 嫦娥一号全月面三维立体图自动构建技术通过鉴定. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(2): 80.

Zou H X. Chang'e-1 full moon graphic model automatic construction technology passed the appraisal. Journal of Equipment Academy, 2009, 20(2): 80. (in Chinese)

49 陈全育. 嫦娥二号任务的六大技术创新与突破. 中国航天, 2010, (10): 6.

Chen Q Y. Six technological innovations and breakthroughs of the Chang'e-2 mission. Aerospace China, 2010, (10): 6. (in Chinese)

50 黄江川. 嫦娥二号卫星技术成就与展望// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集（上册）. 北京: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2012.

Huang J C. Technical achievements and prospects of Chang'e-2 satellite// Proceedings of the 9th Annual Academic Conference of Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics (Volume I). Beijing: Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics, 2012. (in Chinese)

51 叶培建, 黄江川, 张廷新, 等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望.中国科学：技术科学, 2013, 43(5): 467-477.

Ye P J, Huang J C, Zhang T X, et al. Chang'e-2 satellite technical achievements and prospects for China's deep space exploration. Scientia Sinica (Technologica), 2013, 43(5): 467-477. (in Chinese)

52 张巧玲. “嫦娥三号”任务及其初步科学成果. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 85-90.

Zhang Q L. Preliminary scientific achievements of Chang'e-3 mission. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 85-90. (in Chinese)

53 申振荣, 张伍, 贾阳, 等. 嫦娥三号巡视器及其技术特点分析. 航天器工程, 2015, 24(5): 8-13.

Shen Z R, Zhang W, Jia Y, et al. System design and technical characteristics analysis of Chang'e-3 lunar rover. Spacecraft Engineering, 2015, 24(5): 8-13. (in Chinese)

54 郭奕彤, 刘海英, 紫晓. 自主创新树典范 嫦娥工程结硕果——嫦娥三号探测器探月任务创新成果回眸. 中国航天, 2014, (8): 3-7.

Guo Y T, Liu H Y, Zi X. A model of independent innovation, the Chang'e project bears fruit—A review of the innovation achievements of the Chang'e-3 probe lunar exploration mission. Aerospace China, 2014, (8): 3-7. (in Chinese)

55 欧阳自远. 嫦娥四号月背软着陆的重大意义. 世界科学, 2019, (3): 28-30.

Ouyang Z Y. The significance of the soft landing of Chang'e-4 on the far side of the moon. World Science, 2019, (3): 28-30. (in Chinese)

56 叶培建, 孙泽洲, 张熇, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计. 中国科学：技术科学, 2019, 49(2): 124-137.

Ye P J, Sun Z Z, Zhang H, et al. Mission design of Chang'e-4 probe system. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(2): 124-137. (in Chinese)

57 舒云. 内幕纪实——把中国宇航员送上太空. 北京文学, 2001, (11): 1-45.

Shu Y. Inside story—Sending Chinese astronauts to space. Beijing Literature, 2001, (11): 1-45. (in Chinese)

58 石磊. 神剑搏苍穹——航天科技. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 305.

Shi L. The Arrows Beat the Sky—Aerospace Science and Technology. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002: 305. (in Chinese)

59 戚发轫. 神舟号载人飞船研制工作首次取得阶段性重大突破——中国载人飞船的进展简况// 王希季. 20世纪中国航天器技术的进展. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 27-30.

Qi F R. The first major breakthrough in the development

of the Shenzhou manned spacecraft—A brief overview of the progress of China's manned spacecraft// Wang X J. The Progress of Chinese Spacecraft Technology in the 20th Century. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2002: 27-30. (in Chinese)

60 李成智, 郑晓齐. 中国载人航天工程决策过程中航天飞机与载人飞船之争. 科技导报, 2009, 27(18): 19-27.
Li C Z, Zheng X Q. Debate on the priority development of the space shuttle or the manned spacecraft during the decision making of China's manned space program. Science & Technology Review, 2009, 27(18): 19-27. (in Chinese)

61 王永志, 孙功凌. 载人航天工程// 宋健. 中国科学技术前沿（1999/2000）. 北京: 高等教育出版社, 2000: 3-40.
Wang Y Z, Sun G L. China manned space engineering//Song J. The Chinese Technology Frontier Science (1999/2000). Beijing: Higher Education Press, 2000: 3-40. (in Chinese)

62 石磊. 神剑搏苍穹——航天科技. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 314.
Shi L. The Arrows Beat the Sky—Aerospace Science and Technology. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002: 314. (in Chinese)

63 肖名鑫, 张柏楠, 程卓. 可靠性技术在神舟五号载人飞船上的应用. 航天器工程, 2004, 13(4): 4-10.
Xiao M X, Zhang B N, Cheng Z. Application of reliability technology in Shenzhou-5 manned spacecraft. Spacecraft Engineering, 2004, 13(4): 4-10. (in Chinese)

64 戚发轫, 张柏楠, 郑松辉, 等. 神舟五号载人飞船的研制与飞行结果评价. 航天器工程, 2004, 13(1): 1-14.
Qi F R, Zhang B N, Zheng S H, et al. Development and flight result evaluation of Shenzhou-5 manned spacecraft. Spacecraft Engineering, 2004, 13(1): 1-14. (in Chinese)

65 秦文波. 神舟六号载人飞船及其技术改进. 上海航天, 2005, 22(5): 1-5.
Qin W B. Shenzhou-6 manned spaceship and its technology improvement. Aerospace Shanghai, 2005, 22(5): 1-5. (in Chinese)

66 尚志, 张柏楠, 潘腾, 等. 神舟七号出舱活动飞船研制综述. 载人航天, 2009, 15(2): 16-21.
Shang Z, Zhang B N, Pan T, et al. Research and development of Shenzhou-7. Manned Spaceflight, 2009, 15(2): 16-21. (in Chinese)

67 周建平. 天宫一号/神舟八号交会对接任务总体评述. 载人航天, 2012, 18(1): 1-5.
Zhou J P. A review of Tiangong-1/Shenzhou-8 rendezvous and docking mission. Manned Spaceflight, 2012, 18(1): 1-5. (in Chinese)

68 柏合民. 神舟九号天宫之旅的任务与意义. 科学, 2012, 64(5): 1-4.
Bai H M. The mission and significance of the journey of Shenzhou IX to Tiangong I. Science, 2012, 64(5): 1-4. (in Chinese)

69 俞盈帆. 神舟十号载人飞船. 卫星应用, 2013, (4): 72.
Yu Y F. Shenzhou-10 manned spacecraft. Satellite Application, 2013, (4): 72. (in Chinese)

70 邓薇. 天宫二号——中国首个真正意义上的空间实验室. 卫星应用, 2016, (10): 81-82.
Deng W. Tiangong-2—China's first real space laboratory. Satellite Application, 2016, (10): 81-82. (in Chinese)

71 本刊编辑部, 洪鸿, 易靖茗, 等. 神舟十一号载人飞船全程回顾. 台声, 2016, (23): 36-38.
The Editorial Department, Hong H, Yi J M, et al. Full review of Shenzhou-11 manned spacecraft. Taisheng, 2016, (34): 36-38. (in Chinese)

72 白明生, 金勇, 雷剑宇, 等. 天舟一号货运飞船研制. 载人航天, 2019, 25(2): 249-255.
Bai M S, Jin Y, Lei J Y, et al. Research and development of Tianzhou-1 cargo spacecraft. Manned Spaceflight, 2019, 25(2): 249-255. (in Chinese)